大菱鲆幼鱼对几种蛋白质源中营养物质的表观消化率及膨化处理对其产生的影响

杨传哲　何　艮*　周慧慧　麦康森

（中国海洋大学，农业部水产动物营养与饲料重点实验室，青岛 266003）

摘　要：本试验旨在研究大菱鲆（*Scophthalmus maximus* L.）对秘鲁红鱼粉、豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉中干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率，以及膨化处理对其产生的影响。试验饲料由70%基础饲料和30%待测蛋白质源组成，并添加0.1%的三氧化二钇（Y_2O_3）作为外源指示剂，将其分别制作成正常颗粒料和膨化颗粒料。将平均体重为(8.98±0.01) g的大菱鲆幼鱼随机分成10组，每组3个重复，每个重复40尾鱼，按照不同处理分别投喂相应饲料，喂养2周后采用后肠挤压法收集粪便样品至第6周。结果表明：大菱鲆幼鱼对4种蛋白质源中干物质、粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率分别为22.33%~65.50%、48.97%~85.28%、47.70%~84.14%和44.50%~81.16%。其中，鱼粉的各营养物质的表观消化率均显著高于3种植物蛋白质源（P<0.05）；3种植物蛋白质源中以豆粕中粗蛋白质的表观消化率最高，葵花粕次之，玉米蛋白粉最低；各待测蛋白质源中总氨基酸表观消化率的变化趋势与粗蛋白质表观消化率基本一致。经膨化处理后，大菱鲆对4种蛋白质源中营养物质的表观消化率均得到改善，尤其是3种植物蛋白质源，效果显著（P<0.05），膨化处理后4种蛋白质源中干物质、粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率分别为24.26%~70.87%、57.20%~85.33%、68.27%~87.09%和49.23%~84.35%。由此得出，膨化处理能够提高大菱鲆幼鱼对秘鲁红鱼粉、豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉中营养物质的表观消化率。

关键词：大菱鲆；蛋白质源；表观消化率；膨化

中图分类号：S963　　　　　　文献标识码：A　　　　　　　　文章编号：

消化率是指动物所摄入的营养物质在体内被消化吸收的程度。测定蛋白质源的表观消化率是评定蛋白质源营养价值的重要方式，也是研发配合饲料的必要步骤[1-2]。依据蛋白质源的营养价值确定其在饲料中的添加量，可以改善饲料的利用率、降低生产成本和保护水域环境。

收稿日期：2016-01-29
基金项目：替代鱼用饲料中鱼粉的新蛋白源开发利用技术（201303053）
作者简介：杨传哲（1989−），男，山东济宁人，硕士研究生，从事水产动物营养与饲料学研究。E-mail: 878523584@qq.com
通信作者：何　艮，教授，博士生导师，E-mail: hegen@ouc.edu.cn

近年来，作为水产动物主要蛋白质源的鱼粉的产量持续下降且价格不断上涨，如何利用来源广泛、价格低廉的植物蛋白质源替代鱼粉成为研究的热点问题[3]。众多研究表明，由于植物蛋白质源中含有抗营养因子且氨基酸组成的不平衡性，鱼类对植物蛋白质源的表观消化率较低[4-6]。目前常用的改善植物蛋白质源消化利用率的方法有物理法、化学法和生物法，具体包括热处理、膨化加工、微生物发酵、添加外源酶和浸泡等。膨化加工是一种较为常用的物理方法，在挤压膨化条件下，植物蛋白质源中的热不稳定性因子包括抗胰蛋白酶因子和凝集素等抗营养因子遭到破坏，植物蛋白质的结构状态也发生改变，使得营养物质更为容易的被鱼类吸收，从而提高鱼类对植物蛋白质源的消化利用率[7]。

大菱鲆（*Scophthalmus maximus* L.）属于鲽形目，鲆科，菱鲆属，是典型的底栖肉食性鱼类，为我国北方重要的海水经济鱼类之一。大菱鲆对蛋白质的需求较高[8]，但尚未见大菱鲆对常见蛋白质源消化率的研究，如何通过提高消化率最大限度地发挥植物蛋白质源在大菱鲆配合饲料中的作用成为亟需解决的问题。本试验通过研究大菱鲆对秘鲁红鱼粉（Peruvian red fish meal,FM）、豆粕（soybean meal,SBM）、葵花粕（sunflower meal,SFM）和玉米蛋白粉（corn gluten meal,CGM）的干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率以及膨化处理对上述各营养物质表观消化率的影响，为植物蛋白质源在大菱鲆配合饲料中的应用开发提供支持。

1 材料与方法

1.1 试验原料与饲料配制

本试验选取了 4 种蛋白质源，分别为秘鲁红鱼粉、豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉，均采购自青岛七好生物科技有限公司。

试验用基础饲料可满足大菱鲆基本营养需求，试验饲料由 70%基础饲料和 30%待测蛋白质源组成，所有饲料均添加 0.1%三氧化二钇（Y_2O_3）以测定大菱鲆对 4 种蛋白质源的干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率。基础饲料组成及营养水平见表 1，待测蛋白质源的营养水平及氨基酸组成见表 2。基础饲料各饲料原料及蛋白质源均粉碎过 60 目筛，按照重量由小到大逐级混匀后制作颗粒饲料。采用 F-26 双螺杆挤条制粒机和 TSE65 型双螺杆膨化机将饲料分别制作成正常颗粒饲料和缓沉性膨化颗粒饲料。饲料经 45 ℃烘箱干燥 12 h 后置于-20 ℃冰箱中密封保存。

1.2 试验鱼与养殖条件

试验用大菱鲆幼鱼购自青岛胶南养殖厂，养殖试验在青岛胶南亿海丰水产有限公司进行。试验前先将试验鱼在养殖系统中暂养 2 周，投喂商业饲料以适应环境。选取大小均匀、活力较好的试验鱼[平均体重为（8.98±0.01） g]随机分成 10 组，每组 3 个重复，每个重复 40 尾鱼，于室内流水系统中进行养殖。正式试验前，先用基础饲料投喂 1 周，而后各组分别投喂相对应的试验饲料。养殖期间，每天 06:00 和 18:00 饱食投喂 2 次，摄食后进行换水，以保证水质。养殖试验期间，控制水温在 19~22 ℃，盐度在 30‰~33‰，pH 在 7.5~8.0，氨氮浓度低于 0.1 mg/L，亚硝酸盐浓度低于 0.1 mg/L，溶解氧浓度高于 6.0 mg/L。

表 1 基础饲料组成及营养水平（干物质基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (DM basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
鱼粉 Fish meal	50.00
豆粕 Soybean meal	12.95
小麦粉 Wheat flour	25.00
大豆卵磷脂 Soybean lecithin	2.00
鱼油 Fish oil	4.50
维生素预混料 Vitamin premix[1)]	2.00
矿物质预混料 Mineral premix[2)]	2.00
氯化胆碱 Choline chloride	0.30
诱食剂 Attractant	0.50
丙酸钙 Calcium propionate	0.10
乙氧基喹啉 Antioxidant	0.05
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	0.50
三氧化二钇 Y_2O_3	0.10
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels	
干物质 DM	95.11
粗蛋白质 CP	49.17
粗脂肪 EE	12.30
粗灰分 Ash	11.54
总能 GE/(MJ/kg)	20.88

[1)]维生素预混料为每千克饲料提供 The vitamin premix provided the following per kg of the diet：VB_1 0.025 g，VB_2 0.045 g；VB_6 0.020 g，VB_{12} 0.010 g，VK_3 0.010 g，肌醇 inositol 0.800 g，泛酸钙 calcium pantothenate 0.060 g，烟酸 niacin acid 0.200 g，叶酸 folic acid 0.020 g，生物素 biotin 0.060 g，VA 16 000 IU，VD_3 2 500 IU，VE 0.240 g，VC 2.000 g，微晶纤维素 microcrystalline cellulose 16.473 g。

[2)]矿物质预混料为每千克饲料提供 The mineral premix provided the following per kg of the diet：$MgSO_4·7H_2O$ 1.200 g，$CuSO_4·5H_2O$ 0.010 g，$FeSO_4·H_2O$ 0.080 g，$ZnSO_4·H_2O$ 0.050 g，$CoCl_2$ (1%) 0.050 g，$Ca(IO_3)_2$ (1%) 0.060 g，Na_2SeO_3(1%) 0.020 g；沸石粉 zeolite 18.485 g。

表 2　待测蛋白质源的营养水平及氨基酸组成（干物质基础）

Table 2　Nutrient levels and amino acid composition of tested protein sources (DM basis)　　%

项目 Items	秘鲁红鱼粉 FM	豆粕 SBM	葵花粕 SFM	玉米蛋白粉 CGM
营养水平 Nutrient levels				
干物质 DM	91.60	88.93	93.57	90.50
粗蛋白质 CP	72.54	52.49	52.41	65.79
粗脂肪 EE	10.28	2.14	1.27	2.69
粗灰分 Ash	14.76	7.82	7.78	3.89
总能 GE/(MJ/kg)	21.32	19.82	19.68	23.01
氨基酸组成 Amino acid composition				
必需氨基酸 Essential amino acids				
苏氨酸 Thr	2.86	1.90	1.82	2.09
缬氨酸 Val	3.34	2.34	2.52	2.87
蛋氨酸 Met	1.88	0.68	1.18	1.67
胱氨酸 Cys	1.24	0.72	0.75	1.13
异亮氨酸 Ile	2.92	2.29	2.12	2.52
亮氨酸 Leu	4.97	3.70	3.19	9.83
苯丙氨酸 Phe	2.75	2.49	2.38	3.87
酪氨酸 Tyr	2.20	1.65	1.24	2.91
赖氨酸 Lys	5.34	2.99	1.69	1.05
组氨酸 His	2.40	1.32	1.30	1.35
精氨酸 Arg	4.04	3.55	4.09	2.11
非必需氨基酸 Non-essential amino acids				
天冬氨酸 Asp	6.09	5.56	4.52	3.79
丝氨酸 Ser	2.60	2.45	2.09	3.70
谷氨酸 Glu	8.60	8.93	9.77	13.13
甘氨酸 Gly	4.00	2.06	2.81	1.71
丙氨酸 Ala	4.28	2.12	2.17	5.37

1.3　样品收集

粪便样品的收集采取后肠挤压法。暂养期间，通过观察不同时间段（投喂后 1、2、3、4、5 和 6 h）大菱鲆幼鱼的排便情况，确定了样品收集的最佳时间为投喂后 4 h 时。在正式投喂 2 周后开始收集粪便，先用丁香酚（1:10 000）对大菱鲆幼鱼进行麻醉处理，用纱布擦干体表水分并排除尿液，然后在肛门前 3 cm 处轻挤两侧，收集挤压出的粪便，并于-20 ℃冰箱保存。每桶鱼 2 次收集粪便的时间相隔 1 周，保证大菱鲆幼鱼能够恢复到自身正常的生理条件。收集时间为 6 周，以保证粪便样品量足够分析测定的需要。

1.4 指标测定与计算方法

样品中水分含量采取 105 ℃常压干燥法测定，粗蛋白质含量采用凯氏定氮法测定，粗脂肪含量采用索氏抽提法测定，粗灰分含量采用 550 ℃灼烧法测定，总能采用氧弹热量计测定，Y_2O_3 含量采用高频电感耦合等离子体发射光谱法测定，氨基酸组成采取日立 L-8900 自动氨基酸分析仪测定。

各营养物质表观消化率的计算公式[9-10]如下：

$ADC=100\times(1-D_Y/F_Y)$；

$ADC_d=100\times[1-(F/D)\times(F_Y/D_Y)]$；

$ADC_i=[(0.7\times N_r+0.3\times N_i)ADC_t-0.7\times N_r\times ADC_r]/(0.3\times N_i)$。

式中：ADC 为饲料（试验饲料或基础饲料）中干物质的表观消化率（%）；ADC_d 为饲料（试验饲料或基础饲料）中某营养物质的表观消化率（%）；ADC_i 为待测蛋白质源的表观消化率（%）；D_Y 为饲料中 Y_2O_3 的含量（%）；F_Y 为粪便中 Y_2O_3 的含量（%）；F 为粪便中对应营养物质的含量（%）；D 为试验饲料中对应营养物质的含量（%）；ADC_t 为试验饲料中对应营养物质的表观消化率（%）；ADC_r 是基础饲料中对应营养物质的表观消化率（%）；N_r 是基础饲料中对应营养物质的含量（%）；N_i 是待测蛋白质源中营养物质的含量（%）。

1.5 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析（one-way ANOVA），如果差异显著（P<0.05），则进行 Tukey's 多重比较。试验所得数据以平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 大菱鲆幼鱼对正常颗粒饲料中 4 种蛋白质源干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率

如表 3 所示，大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中干物质的表观消化率为 22.33%~65.50%。其中，鱼粉的干物质表观消化率最高，显著高于 3 种植物蛋白质源（P<0.05）；3 种植物蛋白质源的干物质表观消化率也存在显著差异（P<0.05），以豆粕最高，玉米蛋白粉次之，葵花粕最低。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中粗蛋白质的表观消化率为 48.97%~85.28%。其中，鱼粉的

粗蛋白质表观消化率最高，与其他蛋白质源差异显著（P<0.05）；3 种植物蛋白质源中粗蛋白质的表观消化率按高低排序依次是豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉，且三者差异显著（P<0.05）。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中总氨基酸的表观消化率为 47.70%~84.14%，且各蛋白质源的总氨基酸表观消化率与其粗蛋白质的表观消化率变化趋势基本一致。4 种蛋白质源中，鱼粉的各氨基酸和总氨基酸的表观消化率均为最高，以赖氨酸表观消化率最高，为 91.36%，显著高于其他蛋白质源（P<0.05）；3 种植物蛋白质源中以豆粕的总氨基酸表观消化率较高，其次为葵花粕和玉米蛋白粉；3 种植物蛋白质源中精氨酸和蛋氨酸的表观消化率均较高。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中总能的表观消化率为 44.50%~81.16%。其中，鱼粉的总能表观消化率最高，显著高于 3 种植物蛋白质源（P<0.05）；而 3 种植物蛋白质源中总能的表观消化率以豆粕最高，玉米蛋白粉次之，葵花粕最低，且玉米蛋白粉和葵花粕间差异不显著（P>0.05）。

2.2 大菱鲆幼鱼对膨化颗粒饲料中 4 种蛋白质源干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率

如表 3 所示，大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中干物质的表观消化率为 24.26%~70.87%。较之正常颗粒饲料组，除葵花粕的干物质表观消化率未显著变化（P>0.05）外，其他蛋白质源的干物质表观消化率均显著提高（P<0.05），其中鱼粉的干物质表观消化率提高了 5.37%，豆粕的干物质表观消化率提高了 4.00%，玉米蛋白粉的干物质表观消化率提高了 10.72%。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中粗蛋白质的表观消化率为 57.20%~85.33%。较之正常颗粒饲料组，除鱼粉的粗蛋白质表观消化率未显著变化（P>0.05）外，其他蛋白质源的粗蛋白质表观消化率均显著提高（P<0.05），其中豆粕的粗蛋白质表观消化率提高了 7.94%，葵花粕的粗蛋白质表观消化率提高了 6.02%，玉米蛋白粉的粗蛋白质表观消化率提高了 8.23%。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中总氨基酸的表观消化率为 68.27%~87.09%。较之正常颗粒饲料组，4 种蛋白质源的总氨基酸表观消化率均显著提高（P<0.05），鱼粉、豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉依次提高了 2.95%、11.48%、10.34%和 20.57%；除鱼粉部分氨基酸的表观消化率未显著变化（P>0.05）外，4 种蛋白质源中大部分氨基酸的表观消化率均有显著变化（P<0.05）。

大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中总能的表观消化率为 49.23%~84.35%。较之正常颗粒饲料

组，除鱼粉的总能表观消化率未显著变化（P>0.05）外，其他蛋白质源的总能表观消化率均显著提高（P<0.05），其中豆粕的总能表观消化率提高了 7.35%，葵花粕的总能表观消化率提高了 4.73%，玉米蛋白粉的总能表观消化率提高了 8.40%。

表 3　待测蛋白质源各营养物质的表观消化率

Table 3　Apparent digestibility coefficients of nutrients in tested protein sources

(n=3)　　%

项目 Items	FM	FM$_E$	SBM	SBM$_E$	SFM	SFM$_E$	CGM	CGM$_E$
干物质 DM	65.50±0.45^{e}	70.87±0.49^{f}	32.79±0.66^{c}	36.79±0.53^{d}	22.33±0.86^{a}	24.26±0.35^{ab}	26.25±0.59^{b}	36.97±1.02^{d}
粗蛋白质 CP	85.28±0.10^{e}	85.33±0.33^{e}	62.90±0.19^{c}	70.84±0.24^{d}	61.17±0.69^{b}	67.19±0.74^{c}	48.97±0.57^{a}	57.20±0.93^{b}
总能 GE	81.16±0.51^{d}	84.35±0.22^{d}	49.26±0.80^{b}	56.61±0.18^{c}	44.50±1.12^{a}	49.23±0.44^{b}	46.28±0.84^{ab}	54.68±0.99^{c}
必需氨基酸 Essential amino acids								
苏氨酸 Thr	82.25±0.13^{g}	86.7±0.22^{h}	58.55±0.22^{c}	74.01±0.04^{f}	53.50±0.12^{b}	65.22±0.13^{e}	37.83±0.16^{a}	61.27±0.18^{d}
缬氨酸 Val	82.91±0.05^{g}	83.97±0.21^{g}	66.12±0.22^{c}	76.40±0.26^{f}	62.83±0.24^{b}	73.74±0.23^{e}	45.29±0.22^{a}	67.84±0.24^{d}
蛋氨酸 Met	87.92±0.09^{f}	88.28±0.09^{f}	73.12±0.16^{c}	78.10±0.25^{e}	69.68±0.28^{b}	77.21±0.16^{de}	59.57±0.19^{a}	76.33±0.26^{d}
异亮氨酸 Ile	83.23±0.25^{f}	87.53±0.44^{g}	65.65±0.26^{b}	81.28±0.23^{e}	65.66±0.37^{b}	78.23±0.24^{d}	44.17±0.26^{a}	70.15±0.24^{c}
亮氨酸 Leu	86.08±0.21^{f}	90.41±0.25^{g}	74.58±0.11^{c}	86.75±0.05^{f}	67.76±0.22^{b}	82.32±0.16^{e}	63.26±0.21^{a}	78.80±0.24^{d}
苯丙氨酸 Phe	84.6±0.27^{c}	92.32±0.21^{e}	75.25±0.19^{b}	88.96±0.16^{d}	62.21±0.33^{a}	75.6±0.31^{b}	75.24±0.27^{b}	89.55±0.44^{d}
赖氨酸 Lys	91.36±0.28^{g}	91.69±0.22^{g}	69.64±0.30^{d}	84.44±0.22^{f}	64.56±0.23^{c}	79.75±0.15^{e}	20.54±0.17^{a}	52.42±0.25^{b}
组氨酸 His	87.54±0.28^{f}	88.7±0.25^{g}	70.29±0.21^{c}	80.67±0.19^{e}	66.27±0.07^{b}	78.33±0.24^{d}	47.35±0.21^{a}	66.28±0.17^{b}
精氨酸 Arg	88.26±0.24^{f}	87.99±0.27^{f}	81.57±0.11^{c}	85.46±0.22^{e}	83.02±0.25^{e}	86.58±0.25^{e}	60.49±0.40^{a}	72.15±0.15^{b}
Non-essential amino acids								
天冬氨酸 Asp	83.64±0.55^{f}	87.54±0.44^{g}	63.11±0.03^{c}	79.19±0.14^{e}	57.82±0.57^{b}	65.50±0.34^{d}	34.33±0.54^{a}	58.16±0.48^{b}
丝氨酸 Ser	82.47±0.19^{g}	86.42±0.17^{h}	67.81±0.26^{c}	81.67±0.14^{f}	62.06±0.08^{b}	75.03±0.07^{e}	54.34±0.18^{a}	71.38±0.03^{d}
半胱氨酸 Cys	70.51±0.32^{f}	71.06±0.20^{f}	29.87±0.26^{b}	33.08±0.50^{c}	19.51±0.16^{a}	39.59±0.28^{d}	33.45±0.05^{c}	65.37±0.23^{e}
酪氨酸 Tyr	83.24±0.24^{d}	90.6±0.26^{f}	65.54±0.16^{b}	86.25±0.24^{e}	79.14±0.16^{c}	87.21±0.14^{e}	59.54±0.24^{a}	79.61±0.25^{c}
谷氨酸 Glu	85.54±0.42^{f}	86.12±0.54^{f}	67.62±0.12^{b}	72.60±0.09^{d}	70.25±0.37^{c}	75.84±0.22^{e}	54.93±0.41^{a}	67.78±0.42^{b}
甘氨酸 Gly	80.34±0.25^{e}	85.64±0.16^{f}	58.85±0.12^{c}	77.47±0.30^{d}	51.61±0.07^{b}	56.48±0.18^{c}	25.48±0.24^{a}	58.56±0.11^{c}
丙氨酸 Ala	86.27±0.16^{g}	88.52±0.11^{h}	67.68±0.04^{d}	72.57±0.25^{f}	61.63±0.13^{b}	65.37±0.02^{c}	60.36±0.19^{a}	70.64±0.23^{e}
总氨基酸 TAA	84.14±0.14^{g}	87.09±0.13^{h}	65.95±0.24^{c}	77.43±0.40^{f}	63.16±0.15^{b}	73.50±0.04^{e}	47.70±0.26^{a}	68.27±0.17^{d}

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05）；FM 为秘鲁红鱼粉，SBM 为豆粕，SFM 为葵花粕，CGM 为玉米蛋白粉；蛋白质源名称无下标的为正常颗粒饲料组，具有下标 E 的则为膨化颗粒饲料组。

Values in the same row with different small letter superscripts indicate significant differences (P<0.05); FM represents Peruvian red fish meal, SBM represents soybean meal, SFM represents sunflower meal, CGM represents corn gluten meal; names of protein sources with no subscript letter represents the groups of extruded pellet feeds, while with a subscript letter E represents the groups of extruded pellet feeds.

3　讨　论

3.1　试验方法的选择

本试验以大菱鲆幼鱼为研究对象，所得结果可能会因鱼种、生长阶段和试验方法的不同而与其他研究有所差异。由于以测定表观消化率为单一目的，在考虑粪便收集方式对结果影响的基础上[11-13]，同时参照我国水产行业标准对鱼类消化率测定的要求，本试验选取后肠挤压法收集粪便样品。

试验饲料在保证大菱鲆幼鱼基本营养需求的前提下，根据 Cho 等[14]的方法配制，即基础饲料和待测蛋白质源的比例为 7:3。待测蛋白质源中各营养物质的表观消化率的计算采用了改进后的公式[9]（见文中 1.4 部分），该公式消除了由于基础饲料和试验饲料中被测营养物质含量不同对待测蛋白质源中营养物质表观消化率造成的影响，确保了试验结果的准确性。

3.2 大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中营养物质的表观消化率

饲料蛋白质源中蛋白质的质量是影响鱼类营养的首要因子，而消化率是评定饲料蛋白质源营养成分可利用性的重要指标。本试验从蛋白质和能量的角度，对不同蛋白质源中干物质、粗蛋白质、氨基酸和总能的表观消化率进行了测定，以探讨其在大菱鲆饲料中的利用价值。其中，干物质的表观消化率反映了鱼体对蛋白质源的总体消化水平和蛋白质源的营养价值[15]。本试验中，大菱鲆幼鱼对鱼粉的干物质表观消化率最高，而对豆粕、玉米蛋白粉和葵花粕的干物质表观消化率则相对较低。鱼粉因营养均衡和易于吸收利用一直被认为是最佳蛋白质源，本试验测得其干物质的表观消化率为 65.50%，这与在军曹鱼（*Rachycentron canadum*）[16]、大黄鱼（*Pseudosciaena crocea*）[17]和罗非鱼（*Oreochromis niloticus*）[18]等鱼类上的研究结果相类似。研究表明肉食性鱼类对动物性蛋白质源中干物质的利用要优于植物性蛋白质源[19]，这与本试验的结果一致；其原因除了与大菱鲆偏肉食性相关外，还可能与植物蛋白质源中相对较高含量的粗纤维会加快食糜在消化道内的移动和鱼类缺乏相应的纤维素酶有关[20-21]。

蛋白质是鱼类营养的重要成分，测定蛋白质源中粗蛋白质的表观消化率并以此来评定其蛋白质质量，对于饲料配方的合理制订和提高鱼类的生长性能非常有意义[22]。本试验中，大菱鲆幼鱼对鱼粉中粗蛋白质的表观消化率为 85.28%，显著高于豆粕（62.90%）、葵花粕（61.17%）和玉米蛋白粉（48.97%）。目前类似研究有很多，如银鲈（*Bidyanus Bidyanus*）[23]、花鲷鱼（*Hemibarbus maculatus Bleeker*）[24]、黑鲷（*Spurus mucrocephulus*）[25]和大黄鱼

[17]对鱼粉和豆粕中粗蛋白质的表观消化率依次为 86.20%和 76.96%、96.77%和 92.14%、91.35%和 89.64%以及 89.30%和 84.50%，均是鱼粉高于豆粕。对葵花粕中粗蛋白质表观消化率的研究在鱼类上不多，但在哺乳动物上的研究表明葵花粕的粗蛋白质表观消化率较高[26]，本试验中葵花粕中粗蛋白质的表观消化率为 61.17%，说明葵花粕可以被大菱鲆幼鱼较好地利用。玉米蛋白粉具有蛋白质含量高、低纤维素和抗营养因子少等优点，许多研究表明鱼类对玉米蛋白粉中粗蛋白质的表观消化率较高，如虹鳟（*Oncorhynchus mykiss*）[27]、军曹鱼[16]、建鲤（*Cyprinus carpio* var. Jian）[28]和凡纳滨对虾（*Litopenaeus vannamei*）[29]对玉米蛋白粉中粗蛋白质的表观消化率分别为 97.30%、94.42%、92.85%和 90.40%，这与本试验得出的结果 48.97%相差较大，这可能与试验鱼的种类以及玉米蛋白粉的品质有关。

氨基酸是构成蛋白质的基本单位，氨基酸的表观消化率反映了蛋白质源中蛋白质的质量。本试验中，大菱鲆幼鱼对 4 种蛋白质源中总氨基酸的表观消化率与其粗蛋白质的表观消化率的变化趋势大致相同，这与在银鲈[23]、青鱼（*Mylopharyngodon piceus* Richardson）[30]和建鲤[28]上得出的研究结果一致；鱼粉氨基酸组成平衡，各氨基酸的表观消化率均较高；3 种植物蛋白质源中精氨酸的表观消化率较高，而赖氨酸的表观消化率则较低，这可能与二者之间存在拮抗关系有关[31]。

总能的表观消化率反映了鱼类对饲料或蛋白原料中粗蛋白质、脂肪和糖类化合物的利用能力。本试验中，鱼粉中总能的表观消化率为 81.16%，显著高于 3 种植物蛋白质源，这与对虹鳟[27]、尼罗罗非鱼（*Oreochromisniloticus*×*Oreochromis aureus*）[32]和西伯利亚鲟（*Acipenser baerii* Brandt）[33]的研究结果类似。豆粕中总能的表观消化率为 49.26%，这与在杂交条纹鲈（*Morone saxatilis*×*Morone chrysops*）[34]的研究结果（55.24%）相近。玉米蛋白粉的总能表观消化率为 46.28%，而大西洋鳕（*Gadus morhua*）[35]和黑鲈（*Micropterus salmoides*）[36]对玉米蛋白粉中总能表观消化率分别为 82.70%和 76.50%，结果有较大差异，这可能跟试验鱼的种类以及玉米蛋白粉的加工方式有关。

3.3 膨化处理对 4 种蛋白质源中营养物质表观消化率的影响

为了探究膨化处理对植物蛋白质源中营养物质表观消化率的影响，本试验将试验饲料制作成了缓沉性膨化颗粒料并测定了 4 种蛋白质源中营养物质的表观消化率。试验结果表明，与正常颗粒料组相比，膨化颗粒料组的同一蛋白质源的各营养物质的表观消化率均有所改

善。其中，鱼粉的干物质、粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率均有所提高，其中粗蛋白质和总能的表观消化率变化不显著。关于膨化技术对蛋白质源中营养物质表观消化率影响的研究已有很多，一般认为温和的挤压膨化条件能够提高饲料原料中粗蛋白质表观消化率。本试验中，膨化处理改善了鱼粉中各营养物质的表观消化率，这主要是因为膨化过程中产生高温、高压、剪切和摩擦的综合作用，蛋白质、脂肪等有机物的分子键被打断而降解，分子结构变短而不能形成结晶，加之膨化饲料蓬松多孔的物理性状，消化酶更加容易进入鱼粉的内部，有利于消化酶的水解作用，从而提高了鱼粉的表观消化率[37]。

膨化处理使豆粕中干物质、粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率均得到显著改善，分别提高了 4.00%、7.94%、11.48%和 7.35%。类似的报道有很多，如：Cheng 等[38]发现经过挤压膨化，虹鳟对豆粕中粗蛋白质和各氨基酸的表观消化率得到改善；程宗佳[39]研究表明，经过挤压膨化，虹鳟对豆粕中干物质和总能的表观消化率分别提高了 3.00%和 2.80%。膨化处理能够改善豆粕中各营养物质的表观消化率除了跟膨化过程中蛋白质发生变性有关外，主要原因在于部分抗营养因子由于加热变性、钝化而遭到破坏。豆粕中含有蛋白酶抑制剂、凝集素、脲酶和抗维生素因子等热敏性抗营养因子，其中蛋白酶抑制剂能够抑制蛋白酶活性，阻碍鱼类对蛋白质的消化吸收。研究表明，即使较低浓度的蛋白酶抑制剂也能够降低虹鳟对粗蛋白质的表观消化率[40]。凝集素能够与肠上皮细胞内源性表面受体发生作用，影响鱼类的免疫功能并诱导肠炎[41]，降低鱼类自身的消化吸收能力。脲酶在适宜条件下被激活时，能够将豆粕中部分含氮化合物分解成氨，降低了蛋白氮、非蛋白氮的利用率[42]。本试验中，豆粕在挤压膨化过程中蛋白质的变性和抗营养因子的消除，促进了各营养物质的消化吸收，因而豆粕中各营养物质的表观消化率得到显著改善。

膨化处理使葵花粕中粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率得到显著改善，分别提高了 6.02%、10.34%和 4.73%，干物质的表观消化率有所改善但未出现显著变化。李宾等[43]在研究葵仁粕对草鱼肠道氨基酸表观消化率的影响时发现，在葵花粕添加量为 28%的条件下，膨化饲料组的必需氨基酸的肠道表观消化率比普通颗粒饲料组高了 1.44%。除了蛋白酶抑制剂的作用外，葵花粕中的精氨酸酶抑制剂能够抑制精氨酸酶的活性，干扰 *L*-精氨酸的代谢和生物合成过程[44]。在膨化制粒过程中，蛋白酶抑制剂和精氨酸酶抑制剂等热敏性抗营养因子受到高温高压的作用发生钝化。此外，挤压膨化环境还能使葵花粕中的纤维分子间

化学键断裂，可溶性纤维含量升高。膨化过程中，蛋白质变性、可溶性纤维增加和蛋白酶抑制剂等抗营养因子的消除使得葵花粕中各营养物质的表观消化率提高。

玉米蛋白粉的干物质、粗蛋白质、总氨基酸和总能的表观消化率均得到显著改善，分别提高了 10.72%、8.23%、20.57%和 8.40%。相关研究表明，经过挤压膨化后，虹鳟对玉米蛋白粉中干物质和总能的表观消化率分别提高了 11.80%和 8.90%[39]。玉米蛋白粉中抗营养因子含量较低，但膨化能够显著提高其可消化利用性。这是因为玉米蛋白粉中蛋白质含量高，挤压膨化使得蛋白质的高级结构遭到破坏，氨基酸含量增加，从而提高了蛋白质的利用率。此外，挤压膨化能促使玉米蛋白粉中淀粉分子内的糖苷键断裂而生成葡萄糖、麦芽糖及麦芽糊精等低聚糖产物，并且分子间的氢键断裂发生糊化[45]，这种变化使饲料原料中的营养物质易于消化吸收。由于蛋白质等有机物的结构变化、淀粉的降解和糊化，玉米蛋白粉的各营养物质的表观消化率得到改善。

本研究结果表明膨化处理极大地改善了植物蛋白质源的营养价值，各植物蛋白质源中营养物质表观消化率的提高率要远高于鱼粉，其中以豆粕的表现最佳，其粗蛋白质的表观消化率达到了 70.84%；葵花粕中粗蛋白质和总氨基酸的表观消化率均高于玉米蛋白粉，分别达到了 67.19%和 73.50%，但干物质和总能的表观消化率均低于玉米蛋白粉；玉米蛋白粉中各营养物质的表观消化率均提升较大。综上，膨化处理对提升植物蛋白质源在大菱鲆饲料中的应用价值效果显著，值得推广应用。

4 结 论

① 秘鲁红鱼粉中各营养物质的表观消化率均最佳，豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉 3 种植物蛋白质源中各营养物质的表观消化率则相对较低。

② 3 种植物蛋白质源中，豆粕和葵花粕的粗蛋白质和总氨基酸表观消化率要优于玉米蛋白粉，可作为蛋白质源在大菱鲆配合饲料中适当添加。

③ 膨化处理可以显著提高大菱鲆对豆粕、葵花粕和玉米蛋白粉中营养物质的表观消化率，不失为一种提高植物蛋白质源对鱼粉替代量的方法。

参考文献：

[1] GODDARD J S,MCLEAN E.Acid-insoluble ash as an inert reference material for digestibility studies in Tilapia,*Oreochromis aureus*[J].Aquaculture,2001,194(1/2):93–98.

[2] DE SILVA S S,ANDERSON T A.Fish nutrition in aquaculture[M].London:Chapman & Hall,1995:103–142.

[3] AMAYA E A,DAVIS D A,ROUSE D B.Replacement of fish meal in practical diets for the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) reared under pond conditions[J].Aquaculture,2007,262(2/3/4):393–401.

[4] LUNGER A N,MCLEAN E,GAYLORD T G,et al.Taurine supplementation to alternative dietary proteins used in fish meal replacement enhances growth of juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J].Aquaculture,2007,271(1/2/3/4):401–410.

[5] HELLAND S,DENSTADLI V,WITTEN P E,et al.Hyper dense vertebrae and mineral content in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) fed diets with graded levels of phytic acid[J].Aquaculture,2006,261(2):603–614.

[6] HALVER J E,HARDY R W.Fish nutrition[M].3rd ed.London:Academic Press,2002:143–159.

[7] SØRENSEN M.A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods[J].Aquaculture Nutrition,2012,18(3):233–248.

[8] LIM S J,LEE K J.Supplemental iron and phosphorus increase dietary inclusion of cottonseed and soybean meal in olive flounder (*Paralichthys olivaceus*)[J].Aquaculture Nutrition,2008,14(5):423–430.

[9] 游文章,雍文岳,廖朝兴,等.测定鱼类饲料原料营养成分消化率的计算方法[J].水产学报,1993,17(2):167–171.

[10] FORSTER I.A note on the method of calculating digestibility coefficients of nutrients provided by single ingredients to feeds of aquatic animals[J].Aquaculture Nutrition,1999,5(2):143–145.

[11] 林仕梅,罗莉,叶元土.鱼饲料消化率测定方法的研究进展[J].饲料研究,2000(6):8–10.

[12] SMITH B W,LOVELL R T.Determination of apparent protein digestibility in feeds for channel catfish[J].Transactions of the American Fisheries Society,1973,102(4):831–835.

[13] VENS-CAPPELL B.Methodical studies on digestion in trout.Ⅰ.Reliability of digestion coefficients in relation to methods for faeces collection[J].Aquacultural Engineering,1985,4(1):33–49.
[14] CHO C Y,SLINGER S J,BAYLEY H S.Bioenergetics of salmonid fishes:energy intake,expenditure and productivity[J].Comparative Biochemistry & Physiology,1982,73B(1):25–41.
[15] REIGH R C,BRADEN S L,CRAIG R J.Apparent digestibility coefficients for common feedstuffs in formulated diets for red swamp crayfish,*Procambarusclarkii*[J].Aquaculture,1990,84(3/4):321–334.
[16] ZHOU Q C,TAN B P,MAI K S,et al.Apparent digestibility of selected feed ingredients for juvenile cobia *Rachycentron canadum*[J].Aquaculture,2004,241(1/2/3/4):441–451.
[17] 李会涛,麦康森,艾庆辉,等.大黄鱼对几种饲料蛋白原料消化率的研究[J].水生生物学报,2007,31(3):370–376.
[18] GUIMARÃES I G,PEZZATO L E,BARROS M M.Amino acid availability and protein digestibility of several protein sources for Nile tilapia,*Oreochromis niloticus*[J].Aquaculture Nutrition,2008,14(5):396–404.
[19] BERGOT F,BREQUE J.Digestibility of Starch by rainbow trout:effects of the physical state of starch and of the intake level[J].Aquaculture,1983,34(3):203–212.
[20] ANDERSON J,JACKSON A J,MATTY A J,et al.Effects of dietary carbohydrate and fibre on the tilapia *Oreochromis niloticus* (Linn.)[J].Aquaculture,1984,37(4):303–314.
[21] NRC.Nutrient requirements of fish[M].Washington,D.C.:National Academy Press,1993:114.
[22] FOX J M,LAWRENCE A L,LI-CHAN E.Dietary requirement for lysine by juvenile *Penaeus vannamei* using intact and free amino acid sources[J].Aquaculture,1995,131(3/4):279–290.
[23] 周兴华,向枭,陈建.银鲈对六种饲料原料蛋白质和氨基酸的表观消化率[J].西南农业学报,2003,16(3):90–93.

[24] 陈建明,叶金云,沈斌乾,等.花鳕鱼种对 11 种蛋白质饲料原料的消化率[J].水生态学杂志,2009,2(3):65–68.

[25] 陈建明,王友慧,叶金云,等.黑鲷对 10 种饵料原料的表观消化率[J].饲料博览,2004(11):44–46.

[26] 杨桂芹,郭东新,田河,等.葵花籽粕和花生壳在生长兔上的营养价值评定[J].动物营养学报,2011,23(10):1833–1839.

[27] SUGIURA S H,DONG F M,RATHBONE C K,et al.Apparent protein digestibility and mineral availabilities in various feed ingredients for salmonid feeds[J].Aquaculture,1998,159(3/4):177–202.

[28] 梁丹妮,姜雪姣,刘文斌,等.建鲤对 6 种非常规蛋白质原料中营养物质的表观消化率[[J].动物营养学报,2011,23(6):1065–1072.

[29] 韩斌,周洪琪,华雪铭.凡纳滨对虾对玉米蛋白粉表观消化率的研究[J].饲料工业,2009,30(4):24–25.

[30] 明建华,叶金云,张易祥,等.青鱼对 8 种饲料原料中营养物质的表观消化率[J].动物营养学,2012,24(10):2050–2058.

[31] KAUSHIK S J,FAUCONNEAU B,TERRIER L,et al.Arginine requirement and status assessed by different biochemical indices in rainbow trout (*Salmo gairdneri* R.)[J].Aquaculture,1988,70(1/2):75–95.

[32] SKLAN D,PRAG T,LUPATSCH I.Apparent digestibility coefficients of feed ingredients and their prediction in diets for tilapia *Oreochromis niloticus*×*Oreochromis aureus* (Teleostei,Cichlidae)[J].Aquaculture Research,2004,35(4):358–364.

[33] LIU H,WU X,ZHAO W,et al.Nutrients apparent digestibility coefficients of selected protein sources for juvenile Siberian sturgeon (*Acipenser baerii* Brandt),compared by two chromic oxide analyses methods[J].Aquaculture Nutrition,2009,15(6):650–656.

[34] SULLIVAN J A,REIGH R C.Apparent digestibility of selected feedstuffs in diets for hybrid striped bass (*Morone saxatilis* ♀ ×*Morone chrysops* ♂)[J].Aquaculture,1995,138(1/2/3/4):313–322.

[35] TIBBETTS S M,MILLEY J E,LALL S P.Apparent protein and energy digestibility of common and alternative feed ingredients by Atlantic cod,*Gadus morhua* (Linnaeus,1758)[J].Aquaculture,2006,261(4):1314–1327.

[36] PORTZ L,CYRINO J E P.Digestibility of nutrients and amino acids of different protein sources in practical diets by largemouth bass *Micropterus salmoides* (Lacepéde,1802)[J].Aquaculture Research,2004,35(4):312–320.

[37] 赵克振.四种饲料原料粉碎和膨化工艺的研究[D].硕士学位论文.郑州:河南工业大学,2011:1–2.

[38] CHENG Z J,HARDY R W.Effects of extrusion and expelling processing,and microbial phytase supplementation on apparent digestibility coefficients of nutrients in full-fat soybeans for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture,2003,218(1/2/3/4):501–514.

[39] 程宗佳.虹鳟鱼对挤压膨化饲料的养分消化率[J].渔业现代化,2004(4):40–41.

[40] OLLI J J,HJELMELAND K,KROGDAHL A.Soybean trypsin inhibitors in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*,L):effects on nutrient digestibilities and trypsin in pyloric caeca homogenate and intestinal content[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A:Physiology,1994,109(4):923–928.

[41] URÁN P A,GONÇALVES A A,TAVERNE-THIELE J J,et al.Soybean meal induces intestinal inflammation in common carp (*Cyprinus carpio* L.)[J].Fish & Shellfish Immunology,2008,25(6):751–760.

[42] 何学军,齐德生.大豆抗营养因子及豆粕的质量评价[J].饲料研究,2006(5):32–34.

[43] 李宾,叶元土,罗浩,等.棉粕和葵仁粕对草鱼肠道表观氨基酸消化率的影响[J].饲料研究,2011(10):70–72.

[44] BERGE G E,LIED E,SVEIER H.Nutrition of Atlantic Salmon (*Salmo salar*):the requirement and metabolism of arginine[J].Comparative Biochemistry and Physiology Part A Physiology,1997,117(4):501–509.

[45] 刘春雪,高立海,程宗佳.挤压膨化对水产饲料营养成分及消化率的影响[J].广东饲

料,2003,12(3):9–11.

Nutrient Apparent Digestibility Coefficients of Several Protein Sources in Juvenile Turbot (*Scophthalmus maximus* L.) and Effects of Extrusion Treatment on Them

YANG Chuanzhe　HE Gen*　ZHOU Huihui　MAI Kangsen

（*The Key Laboratory of Aquaculture Nutrition and Feed, Ministry of Agriculture, Ocean University of China, Qingdao* 266003, *China*）

Abstract: This experiment was conducted to determine the apparent digestibility coefficients (ADC) of dry matter (DM), crude protein (CP), amino acid (AA) and gross energy (GE) of Peruvian red fish meal, soybean meal, sunflower meal and corn gluten meal in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*. L) and the effects of extrusion treatment on them. Test diets contained 70% basal diet and 30% tested protein source, all diets contained 0.1% yttrium trioxide as an exogenous indicator and were made into normal pellet feed and extruded pellet feed, respectively. Juvenile turbot with the average body weight of (8.98±0.01) g were randomly divided into 10 groups with 3 replicates in each group and 40 fish in each replicate. The fish in different group were fed with the corresponding diet, fecal samples were collected with the method of squeezing the hindgut after 2 weeks and this work was not completed until the sixth week. The results show that the ADC of DM, CP, total AA and GE of four protein sources were 22.33% to 65.50%, 48.97% to 85.28%, 47.70% to 84.14% and 44.50% to 81.16%, respectively. Fish meal showed the significantly higher ADC for all nutrients compared other three protein sources ($P<0.05$). Soybean meal had the highest ADC of CP of three plant proteins, the next was sunflower meal and corn gluten meal presented the lowest value. ADC of total AA of each protein source presented the similar tendency with CP. Apparent digestibility of four protein sources especially the plant protein sources significantly improved after expanding treatment ($P<0.05$), and the ADC of DM, CP, total AA and GE of four protein sources were 24.26% to 70.87%, 57.20% to 85.33%, 68.27% to 87.09% and 49.23% to 84.35%, respectively. The results indicate that extrusion treatment

*Corresponding author, professor, E-mail: hegen@ouc.edu.cn　(责任编辑　菅景颖)

contribute to the improvement of ADC of Peruvian red fish meal, soybean meal, sunflower meal and corn gluten meal in juvenile turbot.

Key words: turbot; protein source; apparent digestibility; extrusion